



UNIVERSIDAD DE CUENCA

FACULTAD DE ARQUITECTURA Y URBANISMO
MAESTRÍA EN ARQUITECTURA BIOCLIMÁTICA, PRIMERA COHORTE

INVENTARIO DEL CICLO DE VIDA PARA LA DETERMINACIÓN DE LA ENERGÍA INCORPORADA
Y LAS EMISIONES DE CO₂ EN EL PROCESO DE ELABORACIÓN DEL BLOQUE EN UNA FÁBRICA
DE CUENCA – ECUADOR.

ARTÍCULO CIENTÍFICO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL GRADO DE
“MAGISTER EN ARQUITECTURA BIOCLIMÁTICA, CONFORT Y EFICIENCIA ENERGÉTICA”

AUTOR: ARQ. DIANA ROSITA URGILÉS ESQUIVEL
C.I.: 0301937207

DIRECTORA: ARQ. VANESSA FERNANDA GUILLÉN MENA, MSC
C.I.: 0104436357

CUENCA-ECUADOR
2017



Universidad de Cuenca

Cláusula de Licencia y Autorización para publicación en el Repositorio Institucional

Diana Rosita Urgilés Esquivel, en calidad de autora y titular de los derechos morales y patrimoniales del artículo científico "Inventario del ciclo de vida para la determinación de la energía incorporada y las emisiones de CO2 en el proceso de elaboración del bloque en una fábrica de Cuenca – Ecuador", de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este artículo científico en el Repositorio Institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 25 de Noviembre de 2017

Diana Rosita Urgilés Esquivel

C.I: 0301937207



Universidad de Cuenca
Cláusula de Propiedad Intelectual

Diana Rosita Urgilés Esquivel, autora del artículo científico "Inventario del ciclo de vida para la determinación de la energía incorporada y las emisiones de CO₂ en el proceso de elaboración del bloque en una fábrica de Cuenca – Ecuador", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autora.

Cuenca, 25 de Noviembre de 2017

Diana Rosita Urgilés Esquivel

C.I: 0301937207



Inventario del ciclo de vida para la determinación de la energía incorporada y las emisiones de CO₂ en el proceso de elaboración del bloque en una fábrica de Cuenca – Ecuador

Diana Rosita Urgilés Esquivel.

Maestría en Arquitectura Bioclimática, confort y eficiencia energética I Cohorte, Universidad de Cuenca. Cuenca, Ecuador.
dianaue00@yahoo.com

Vanessa Fernanda Guillén Mena.

Facultad de Arquitectura y Urbanismo. Universidad de Cuenca. Cuenca, Ecuador. vanessa.guillen@ucuenca.edu.ec

Resumen

La industria de la construcción es uno de los principales responsables de los impactos generados al medio ambiente, ha causado graves consecuencias en los entornos naturales y humanos, por lo que es urgente la necesidad de mitigar los problemas que han surgido junto con la moderna forma de vida. La presente investigación se enfoca en la elaboración del Inventario del Ciclo de Vida del bloque, fabricado en Cuenca – Ecuador, siguiendo la norma ISO 14040:2006 con el fin de cuantificar la energía incorporada y las emisiones de CO₂ del proceso de fabricación de bloques de pómez, mixto y hormigón, considerando los límites de "puerta a puerta". Para los cálculos se emplean datos de la literatura, referencias del contexto nacional y la recopilación de datos correspondientes a los flujos de entradas y salidas durante un año de producción. El caso de estudio mostró que, considerando los tipos de bloque de 15 cm, la energía incorporada oscila entre 12.33 MJ/bloque (hormigón) y 26.33 MJ/bloque (pómez); mientras que en emisiones de CO₂ la variación es de 1.20 kgCO₂/bloque (hormigón) a 2.09 KgCO₂/bloque (pómez). El transporte presenta una incidencia significativa en los resultados por el consumo de Diésel.

Palabras claves

Análisis de ciclo de vida, inventario de ciclo de vida, energía incorporada, emisiones de CO₂, bloque

Abstract

The construction industry is one of the main responsible for the impact generated to the environment, it has caused serious consequences in natural and human environments, so the need to mitigate the problems that have arisen along with the modern way of lifetime is urgent. The present investigation focuses on the development of the Block Life Cycle Inventory, manufactured in Cuenca - Ecuador, following the ISO 14040: 2006 standard in order to quantify the incorporated energy and CO₂ emissions from the pumice, mixed, and concrete block manufacturing process, considering the boundaries of "gate to gate". For the calculations, literature data, references from the national context and the collection of data corresponding to the inputs and outputs during a production year are used. The case study showed that, considering the block types of 15 cm, the incorporated energy ranges between 12.33 MJ/block (concrete) and 26.33 MJ/block (pumice); while in CO₂ emissions the variation is 1.20 kgCO₂/block (concrete) to 2.09 KgCO₂/block (pumice). Transportation has a significant impact on the results of diesel consumption.

Keywords

Life - cycle assessment, life - cycle inventory, embodied energy, CO₂ emissions, blocks

I. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, el mundo se enfrenta a problemas ambientales significativos causados por la sociedad industrial, tales como: el calentamiento global, el agotamiento de la capa de ozono, la acumulación de residuos sólidos, emisiones de gases de efecto

invernadero (GEI), agotamiento de recursos, entre otros [1]; aspectos que generan graves consecuencias para los entornos naturales y humanos. La necesidad de mitigar esos problemas que han surgido con el estilo de vida contemporáneo, es urgente [2].

Con el informe nuestro futuro común [3], un primer acuerdo mundial se origina y se incorpora el concepto de desarrollo sostenible en varias disciplinas, entre ellas en la arquitectura dentro del ámbito de la construcción, que al igual que otras industrias, se basa en el modelo productivo dominante que consiste en la extracción, fabricación, uso y residuos [4]. Por esta razón, la sostenibilidad ambiental debe ser analizada en la industria de la construcción [5], ya que representa una preocupación mundial inminente entre el crecimiento económico, y el uso eficiente y sostenible de los recursos [6]. De esta manera, los indicadores sociales, económicos y ambientales del desarrollo sostenible están tomando importancia dentro de esta área tanto en países desarrollados como en los que están en vías de desarrollo [2].

En este sentido, el grado de sostenibilidad en un proceso de producción, puede ser medido mediante criterios como: el contenido energético total (energía necesaria para producir, empaquetar, distribuir, utilizar y eliminar un material); las emisiones de contaminantes (GEI, polvo, otras sustancias químicas y naturales); el uso de materias primas; la generación de residuos, la reciclabilidad, entre otros. Adicional a ello, la incidencia del transporte es también responsable de una parte significativa de los impactos ambientales en el ciclo de vida de los productos [7]. Sin embargo, las consecuencias de esta actividad, a menudo son impredecibles, el 15% de las emisiones globales de CO₂ se atribuyen a este sector [8].

La construcción es una de las industrias que contribuye a la mayor cantidad de emisiones de GEI. Según el Instituto Americano de Arquitectos (AIA, 2007), se estima que casi el 50% de todas las emisiones de GEI fueron generadas por los edificios y sus construcciones, en términos de energía [9].

La evaluación ambiental de los edificios y sus materiales son factores significativos hacia la sostenibilidad en la industria de la construcción y el entorno construido [6], ya que, se genera un consumo de energía directa durante todo el proceso de construcción, operación, renovación y demolición; e indirecta, en la etapa de fabricación de los materiales de construcción [2]. Estos dos tipos de energía, son componentes de la energía incorporada [10], factor clave para calcular la energía total de un edificio [11]. Se conoce que, para construir un metro cuadrado de edificación estándar, se puede suponer un consumo de energía equivalente a 6 000 MJ [12].

En los últimos años se ha incrementado el interés por cuantificar y reducir los impactos ambientales provocados por el uso de determinados materiales en las edificaciones [13]. Sobre ello, existen estudios que revelan datos ajustados a características particulares de cada lugar y que son incidentes en los resultados, tales como: el mix energético, las rutas tecnológicas de los procesos productivos, el sistema de transporte, entre otros [14].

En ese sentido, a medida que los asuntos ambientales toman importancia, el énfasis sobre la eficiencia energética y el control de emisiones en la construcción y producción de insumos, se hacen necesarios [15], la selección de materiales con bajos impactos reducen el potencial de calentamiento global y las emisiones de CO₂, en un 30% [6].

En el Ecuador, el sector industrial se encuentra directamente ligado a la demanda de energía y requiere un consumo elevado. De acuerdo al Balance Energético Nacional 2016, con año base 2015, la industria emplea el 18.8% de la energía total del país, y el sector de la construcción el 5.9% [16]. Por lo que es pertinente, desarrollar investigaciones encaminadas al manejo eficiente de los recursos energéticos para un óptimo desarrollo de la misma [17]. No obstante, la carencia de normativas y certificaciones sobre materiales industriales, es evidente [18]; situación que influye en el desconocimiento de datos cuantitativos de los impactos ambientales resultantes del proceso de fabricación de los materiales de construcción.

En este contexto y a pesar del creciente desarrollo de nuevas tecnologías, los bloques representan el principal insumo utilizado en mampostería para edificaciones. Según datos del Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC), en el año 2015 el porcentaje de uso de este material fue del 61,5%; seguido del ladrillo de arcilla con un 36,4% [19][20]. Esta mayoritaria utilización se debe a ventajas en soluciones constructivas, trabajabilidad y costo [21].

La fabricación del bloque, supone un consumo significativo de energía en las etapas de producción, transporte y aplicación [22]; y en consecuencia, emisiones de CO₂. Pocos estudios se enfocan en los mismos y en la evaluación de sus impactos ambientales. Hace falta información científica y técnica confiable sobre los bloques en general [23].

En Cuenca se dispone de un número considerable de fábricas dedicadas a la producción de diversos tipos de bloque: hormigón (pesado), mixto (semi pesado) y pómez¹ (liviano); en distintas dimensiones. La tecnología utilizada para ello, define su carácter como artesanal o semi industrial. La cantidad de piezas elaboradas están supeditadas a la demanda, que por lo general es constante. Sin embargo, la carencia de eco-etiquetas o declaraciones ambientales en los productos deja a esta actividad como empírica si de responsabilidad ambiental, en la categoría de uso de materiales, se trata [24]. Situación a considerar, más aún cuando la metodología del Índice de Ciudades Emergentes y Sostenibles, indica que las emisiones de GEI corresponden a 2.42 toneladas anuales de CO₂ per cápita; estableciendo a la ciudad en un nivel verde [25].

La presente investigación se enfoca en realizar el Inventario del Ciclo de Vida del bloque, mediante la metodología del Análisis de Ciclo de Vida Simplificado, con el fin de obtener indicadores específicos para la ciudad de Cuenca. Los resultados podrían

¹ Pumita, contiene un agregado liviano, que es principalmente un aluminosilicato, mineral que contiene óxido de aluminio (Al₂O₃) y sílice (SiO₂); de origen volcánico, que se produce a partir del enfriamiento rápido de la lava fundida, con una

estructura similar a una esponja y se encuentra en forma granulada [63].



almacenarse en un inventario nacional de materiales de construcción.

El objetivo es cuantificar la energía incorporada en el proceso de fabricación de diferentes tipos de bloque y sus respectivas emisiones de CO₂. Se plantea, determinar que los valores obtenidos en la producción del bloque de pómez, son mayores a los que resultan del bloque de hormigón y mixto.

El estudio se fundamenta en las normas internacionales: ISO 14040:2006; ISO 14044:2006; ISO 14049:2012; ISO 150041. Documentos que el Instituto Ecuatoriano de Normalización (INEN) considera para la Norma Técnica Ecuatoriana; siendo esta, una adopción idéntica a la traducción oficial de la Norma Internacional [26] [27][28][29][30]. La Comisión Europea revela que esta metodología constituye el mejor marco disponible para evaluar los impactos ambientales de cualquier producto o actividad [12].

1.1 Fabricación del bloque

El bloque es una pieza prefabricada simple hecha a base de cemento, agua y áridos finos y gruesos, en forma de paralelepípedo, con uno o más huecos transversales en su interior, de modo que el volumen del material sólido sea del 50% al 75% del volumen total del elemento [31].

Su fabricación requiere de energía y de materiales naturales [32], la influencia de la transportación y la calidad de los insumos utilizados, es incidente en el perfil ambiental de los productos finales [33]. Los principales componentes del proceso de producción son: los agregados, el cemento y el agua; además, energía eléctrica y combustibles; sin dejar de considerar el uso de aditivos y la generación de residuos.

En cuanto a los agregados, a nivel global, el 40% de las materias primas son extraídas generando un alto consumo de recursos naturales y energía [34]. Los principales minerales extraídos para la elaboración de materiales de construcción, son: arena, grava, arcillas, calizas, esquistos (materia prima del cemento), piedras pulidas y otras de origen volcánico. Dentro de esta variedad, los agregados que se emplean en la fabricación de los distintos tipos de bloques son: Lapilli² (comúnmente, en nuestro medio llamado chasqui), polvo volcánico y polvo de piedra triturada; materiales que poseen características de conductividad térmica ligera y relativamente baja [23].

Estudios, han evidenciado que, los impactos por transporte de áridos naturales de la cantera al consumidor final, se incrementan; pues en la mayoría de casos, el transporte se realiza por carretera y las minas se ubican a distancias mayores de 100

km de los consumidores; por tanto, el consumo de combustible es determinante [34].

En relación al cemento, se ha demostrado que, en la fabricación del bloque, la carga ambiental se genera principalmente por la producción de cemento [35]. El Clinker es el principal material utilizado a nivel mundial para producir cemento, el mismo que libera 1 tonelada de CO₂ por tonelada de Clinker producido [36].

Referido al agua, es complejo definir datos de inventario, particularmente en la fabricación de productos cementosos³. Hasta la fecha, la literatura no cita una metodología para determinar la huella de agua en la elaboración de bloques, pues las condiciones son variadas; parte del agua de la mezcla se evapora, otra se combina con cemento y otra permanece como humedad [14].

Dentro del proceso de producción de bloques, la energía eléctrica y los combustibles también juegan un papel importante y su incidencia depende de la ruta tecnológica de cada fábrica.

Respecto a los aditivos, a nivel general, son limitados los estudios que muestran los resultados de energía incorporada y emisiones de CO₂ [33]. Comúnmente, los aditivos no son mencionados en los ACV, debido a que, pueden estar restringidos a una o pocas categorías de impacto, donde tienen reducida contribución [37].

En torno a la generación de residuos, en la producción de bloques se considera como tal, a todo aquello que abandona la fábrica y está destinado al vertedero, reciclaje o recuperación de energía. Generalmente, en las etapas de producción y en la distribución, se obtienen piezas defectuosas o rotas, por fallas de reología o manejo del producto en estado fresco. Entonces, los productos defectuosos son triturados y se incorporan nuevamente al ciclo de vida. El registro de estas pérdidas no es representativo dentro de un ACV, su eliminación no implica un impacto, ya que en la mayoría de ocasiones vuelve a la producción. Sin embargo, registrar la parte de los productos defectuosos que pueden volver al sistema, permite evaluar la eficiencia de los procesos, transporte y almacenamiento [38].

En el caso de Ecuador, no se dispone de datos nacionales de energía incorporada y emisiones de CO₂ que se generen de la extracción y procesamiento de los agregados, ni de otros materiales de construcción como el cemento o bloques.

1.2 Análisis del Ciclo de Vida (ACV)

Es un método estructurado e integral, manejado a nivel internacional e impulsado a la normalización por la SETAC (Society of Environmental Toxicology and Chemistry) y la ISO (International Standards Organization). Asume un enfoque

² Agregado de origen volcánico que proporciona una baja densidad y conductividad térmica a los bloques, debido a su alta porosidad [58].

³ Formados por mezcla de cemento, agregados y agua, con o sin la incorporación de aditivos o adiciones, que desarrolla sus propiedades por el endurecimiento de la pasta de cemento” [62].

científico detrás de las políticas ambientales modernas relacionadas con la industria y la producción sostenible [39].

La figura 1 muestra las cuatro fases que conforman un estudio de ACV: definición del objetivo y el alcance; análisis del inventario; evaluación del impacto ambiental; interpretación [27].

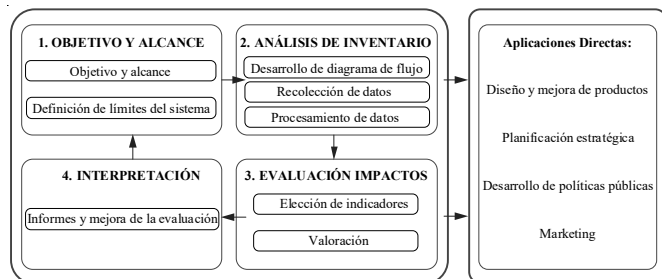


Figura 1 - Diagrama de las fases de un ACV

Un ACV abarca todas las etapas del ciclo de vida; su desarrollo precisa de equipos, mediciones específicas y personal especializado, durante un periodo determinado; su nivel de detalle, depende de objetivos particulares. Existen casos en los cuales un ACV se puede satisfacer desarrollando únicamente un análisis de inventario y una interpretación, operación denominada estudio de Inventario de Ciclo de Vida (ICV) o Análisis del Ciclo de Vida Simplificado [27].

El ICV se sujeta a la recopilación de datos de **entrada – inputs**: recursos, materias primas, transporte, electricidad, energía, entre otros. Asimismo, datos de **salida – outputs**: emisiones al aire, agua, suelo; residuos y subproductos [40]. En este tipo de estudio, se excluyen ciertos componentes de la fase total de evaluación, conforme los objetivos que persiga el análisis [27].

Sin embargo, es preciso la selección de categorías de impacto ambiental, contempladas por la SETAC; las mismas que representan los impactos de interés de los cuales se desean obtener resultados [40].

Cabe señalar que, en lo referente a ACV o ICV aplicados en la industria de los bloques, la información es reducida [14] [33]. En el caso de los bloques de hormigón, pocos estudios abordan los impactos ambientales relacionados con su ciclo de vida [14].

Sin embargo, a nivel general se dispone de declaraciones ambientales de algunas empresas de bloques de hormigón [41] [42][43][44]. Otras publicaciones se enfocan en realizar comparaciones entre mamposterías de bloque con una variedad de materiales alternativos [14]. En cuanto al bloque de pómez y mixto, los datos son escasos.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Metodología

La investigación presenta un enfoque cuantitativo, no experimental. Se analizan las categorías: Consumo de recursos energéticos y Calentamiento Global; pues se tiene como objetivo

determinar la energía incorporada y emisiones de CO₂ en el proceso de fabricación de distintos tipos de bloques, en un caso de estudio localizado en la ciudad de Cuenca. Se desarrolla sobre la base de datos originales correspondientes a la producción del año 2016. Para el cálculo del inventario, se aplica un procedimiento simplificado, según lo indica las normas ISO 14044 e ISO 150041 [27].

La tabla 1 evidencia las especificaciones por tipo de bloque, tales como: dimensión, masa unitaria, masa seca al horno y absorción [9]; esta última, obtenida mediante ensayo en laboratorio, siguiendo la norma INEN 642. La selección de la muestra se realiza considerando la norma INEN 639, la que señala que, con un tamaño de lote de hasta 1200 piezas, la muestra a considerar es de 3 bloques. Estos valores se obtienen con el fin de estimar el consumo aparente de agregados, sobre la base de la masa de un bloque unitario y para analizar el consumo del agua [14].

Tabla 1 - Tipos de bloques utilizados para el estudio

Designación Producto		Dimensiones			masa unitaria del bloque *	masa bloque seco al horno*	bloque seco / masa unitaria bloque*
		Espesor	Altura	Largo			
		cm	cm	cm	Kg	Kg	absorción
BP 10	Bloque de Pómez	10	20	40	7.069	5.751	0.814
BP 15		15	20	40	9.463	7.045	0.744
BP 20		20	20	40	10.74	7.336	0.683
BM 10	Bloque mixto	10	20	40	7.309	5.852	0.801
BM 15		15	20	40	10.261	8.378	0.816
BH 10	Bloque de hormigón	10	20	40	8.582	8.332	0.971
BH 15		15	20	40	12.789	11.051	0.864

* Nota: Datos obtenidos en el laboratorio de la Universidad de Cuenca - Norma en ensayo: INEN 642
Fuente: La autora

Mediante un modelo metodológico (Santana Oliveira L. et al., 2016), se consideran datos primarios relacionados con el total anual de cada uno de los insumos empleados en la producción, analizando cinco indicadores básicos: 1. consumo de agua; 2. consumo de materias primas; 3. residuos; 4. energía; 5. emisiones de CO₂ [14].

En base a los lineamientos de la norma ISO 14049, se define que tienen reducido impacto los materiales que contribuyen con menos del 5% de las entradas de masa en el proceso [28], por lo tanto, para este caso particular, se excluye el consumo del aditivo. Adicionalmente, se emplean datos secundarios, referidos a la energía incorporada y los factores de emisión del cemento [14].

En cuanto a la recopilación de datos, unidades y conversiones. Se cuantifican: flujos de materiales (materia prima), flujos de energía (energía eléctrica y combustible por transporte de materiales) y flujos contaminantes (emisiones de CO₂) [45].

Las unidades que se manejan inicialmente, están en función de los registros particulares de la fábrica. En el caso de agregados (metros cúbicos); cemento (kilogramos); consumo de agua (metros cúbicos); electricidad (kWh). La producción y los residuos, fueron informados por número de pieza y por tipo de

Para los cálculos, se consideran rangos mínimos y máximos en lugar de promedios individuales, debido a que estos resultados son sensibles a los procesos de fabricación, a la disponibilidad de recursos locales, a la eficiencia de producción y a la cantidad de materiales utilizados. La adopción de un valor medio crea un escenario diferente del real [14].

No obstante, respecto a las emisiones de CO₂, la memoria de sostenibilidad de una empresa cementera en el país, revela un valor de 530 kg de CO₂ / t por producción de cemento [49], información que se analiza mediante la revisión de otro documento homólogo, de la misma empresa y en el mismo año, pero en un país vecino, cuyo valor es: 532 kg de CO₂ / t de cemento [50]. Sobre la base de estos indicios, se considera los valores mínimos y máximos de energía incorporada y emisiones de CO₂ que presenta la literatura sobre el cemento [38].

Respecto al Diesel, se consideran valores de energía incorporada y emisiones de CO₂ de estudios nacionales [47] [51]. Finalmente, se presenta el factor de emisión de CO₂ de la energía eléctrica, (dato nacional) [52].

La figura 2 muestra el procedimiento que se considera para el desarrollo del inventario.

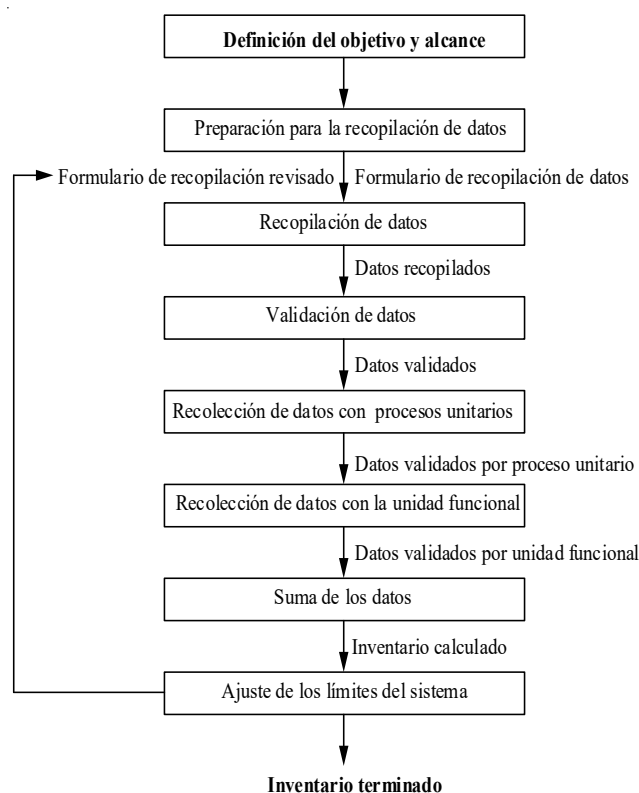


Figura 2 – Procedimiento para el análisis del inventario

2.2 Caso de estudio

La fábrica en análisis, produce bloque de pómez, mixto y hormigón; emplea una máquina bloquera que trabaja con energía eléctrica bajo una acción combinada por presión y vibración, que permite alcanzar un prefabricado de alto rendimiento. Se encuentra provista de diferentes moldes de hierro, intercambiables y de tamaño variable, para conformar los bloques dependiendo de las dimensiones del producto final requerido.

Las actividades que se realizan en el proceso, consisten en: adquisición de materias primas, dosificación, mezclado y prensado. En el caso de los agregados, estos son almacenados sin cobertura y transportados en carretillas para la fase de dosificación, en donde también se adiciona manualmente el agua y aditivo. La mezcla con una composición consistente, es despachada hacia la prensa para conformar cada una de las piezas; los productos resultantes, son trasladados a la zona de secado al aire libre.

En las etapas de traslado de materiales, dosificación y remoción de los productos para el curado, la actividad humana es intensa. Pero, debido a las diferencias en las actividades de cada país, la disponibilidad de tecnología, la alimentación, estilos de vida y diferencias regionales; las huellas de trabajo humano, son difíciles de evaluar con precisión [53]. Por lo que, este aspecto no se cuantifica como una variable de análisis en este estudio.

2.2.1 Objetivo y alcance

El objetivo del estudio es desarrollar el ICV del bloque para determinar la energía incorporada y las emisiones de CO₂ asociadas a su proceso de producción. Se adoptó un límite del sistema de “puerta a puerta”, en donde se analizan los procesos unitarios en la etapa de producción del material y la incidencia del transporte indirecto por materias primas.

Debido a que el ingreso de insumos se realiza mediante diversos tipos de camiones, se analiza únicamente la entrega; no se cuantifican los impactos causados por el retorno, porque hay incertidumbre si el vehículo vuelve vacío, llevando otro producto una vez que sale de la planta y porque son variables las distancias de sus posibles traslados [14].

La unidad funcional declarada es un “bloque unitario”. El resultado de energía incorporada se expresa en MJ/bloque y las emisiones de CO₂ en kgCO₂/bloque. El tiempo que se estable para el análisis es de 60 años, tiempo de vida media de los principales materiales que conforman las soluciones de construcción analizadas [54]. El período considerado es 12 meses, con el fin de diluir eventos estacionales y períodos de mayor y menor producción [14].

2.2.2 Análisis del inventario de ciclo de vida del bloque

Se define el diagrama de flujo del proceso de fabricación de todos los tipos de bloque analizados (ver figura 3), en donde las principales entradas son: el cemento, el agua y los agregados (chasqui, polvo volcánico, polvo de piedra triturada); el combustible empleado para el transporte de cada materia prima y la electricidad consumida por la máquina bloquera en los procesos de dosificación, mezclado y prensado del material.

Las salidas están asociadas al producto final, es decir al valor de energía incorporada en cada bloque, sus respectivas emisiones de CO₂ y los residuos.

Mediante la aplicación de cinco formularios de encuesta, elaborados sobre la base del Anexo A de la norma ISO 14044, se obtiene la información primaria referente al consumo total de cada materia prima, agua y energía eléctrica; también, se solicita la producción total de la planta, antecedentes sobre residuos y transporte. (Ver apéndice A).

La figura 3 muestra el diagrama de flujo del proceso de fabricación, el mismo que corresponde a todos los tipos de bloque analizados.

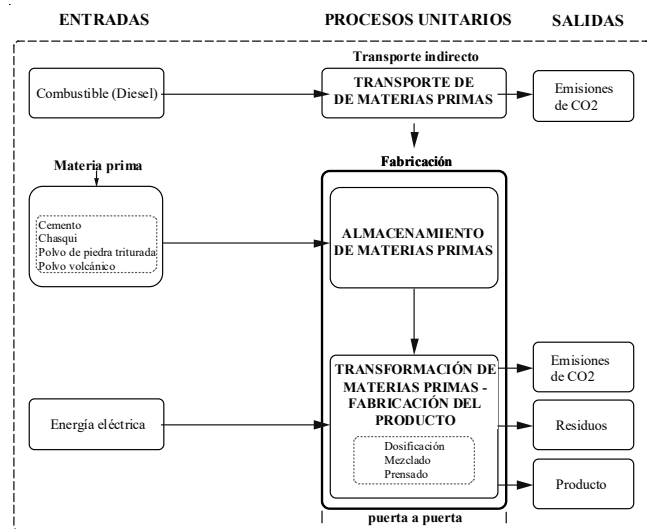


Figura 3 - Diagrama de flujo del proceso de fabricación del bloque

2.3 Métodos de cálculo

Para determinar la energía incorporada y las emisiones de CO₂ relacionadas con cada uno de los tipos de bloque, se considera

⁴El agua contenida en los materiales con cemento depende del equilibrio entre su entorno atmosférico y las propiedades de la masa. De esta forma, el perfil de contenido de humedad puede variar con la climatología [59]. Para determinar la cantidad de agua en equilibrio con la humedad atmosférica (o actividad del agua), se requiere de ensayos e instrumentación especializada. Para el estudio, se considera el porcentaje de absorción de los bloques, obtenidos en laboratorio siguiendo la norma INEN 642

la metodología de cálculo de (Santana Oliveira L., 2015) [38]. En donde, los impactos citados se consiguen a partir del cálculo de los siguientes parámetros:

2.3.1 Consumo e Indicador de cemento

La cantidad anual de consumo de cemento, se obtiene sobre la base de registros del área de producción. Se considera el número de sacos empleados por tipo de bloque producido, estos valores son convertidos a unidades de masa. Para definir el indicador, se toma en cuenta el número de bloques por tipo, producidos al año; a partir de ello, se obtiene el contenido de cemento en t/bloque [38].

2.3.2 Consumo e Indicador de agua

El agua que emplea la fábrica proviene de la red pública y su consumo anual se encuentra expresado en m³. La masa de agua está relacionada con el agua que reacciona químicamente con el cemento (20% de la masa de cemento) más el agua que está en equilibrio con la humedad del aire, (7%⁴ fue adoptada)[14].

$$mw = 20\% (mcem.bloque) + 7\% (mu.bloque) \quad (1) \quad [14]$$

Donde:

mw = masa de agua
mcem.bloque = masa de cemento por bloque
mu.bloque = masa unitaria por bloque

La cantidad de agua empleada para producir un bloque se estima mediante la aplicación de la ecuación (1). Para este indicador, el litro (l) es la unidad de referencia; se obtiene el consumo de agua por tipo de bloque en (l/bloque). El dato que se dispone es del agua agregada a materiales secos, no su composición total, es decir, agua añadida y agua contenida en los agregados. [38]

2.3.3 Consumo e Indicador de agregados

Uno de los formularios de encuesta aplicados, solicita el consumo anual de cada materia prima y la producción total de la fábrica, estos valores se informan en m³ y por número de bloques respectivamente. Esta estimación se realiza para hacer posible los procedimientos de asignación del consumo de cada materia prima reportada por la fábrica. [38]

El indicador de agregados precisa de la cantidad de cada materia prima utilizada para producir cada tipo de bloque, la misma que

[60]. De la diferencia entre la humedad relativa anual del lugar donde se realiza el ensayo (89%) y la media obtenida del porcentaje de absorción de los bloques (82%), se obtiene la actividad del agua (7%) [61].

se estima en función de las dimensiones de cada uno de ellos. La masa de agregados consumida en cada bloque, se calcula mediante la ecuación (2). El valor es expresado en kg / bloque. [38]

$$m \text{ agreg. bloque} = m_u \text{ bloque} - m_{\text{cem. bloque}} - m_w \quad (2) \quad [14]$$

Donde:

$m \text{ agreg. bloque}$ = masa de agregados por bloque
 $m_u \text{ bloque}$ = masa unitaria del bloque
 $m_{\text{cem. bloque}}$ = masa de cemento por bloque
 m_w = masa de agua

El material analizado emplea más de un tipo de agregado en su composición, entonces se estima la cantidad de cada agregado en función de la dosificación y datos de la fábrica. Multiplicando la masa total de agregados en cada pieza con la proporción estimada de cada tipo de agregados, se determina el consumo de cada tipo de agregado por bloque. [38]

2.3.4 Consumo de combustible por transporte de materias primas

La incidencia por transporte de materia prima hacia cada tipo de bloque es analizada, para ello se consideran los datos recopilados en el formulario de encuesta correspondiente. En la Tabla 3 se muestra los parámetros que se requieren para determinar este consumo, el mismo que incluye: el tipo de transporte para los cuatro insumos materiales que ingresan a la fábrica, la marca, modelo, año y tecnología de los vehículos. A partir de ello, se determina: el número de viajes requeridos para transportar cada uno de los insumos materiales; la masa total del transporte, considerando las fichas técnicas de los camiones (homologados en Ecuador) y la distancia recorrida desde la mina o depósito hasta la fábrica. También se requiere del valor de la cantidad total de cada materia prima que ingresa en el periodo de estudio.

Tabla 3 - Tipos de transporte, consumo de Diesel

Producto o materia prima	Tipo de vehículo	Marca / modelo / año / tecnología	Consumo Diesel	Consumo Diesel
			mínimo l/t	máximo l/t
Cemento	Camión	Hino Dutro 2005 - Euro 3	0.03	
		Chevrolet NQR 2010 - Euro 4		0.1002
Chasqui	Camión	KEN WORTH T370 - Euro 3	2.99	
		Mercedes Benz Actross - Euro 2		11.20
Polvo volcánico	Camión	KEN WORTH T370 - Euro 3	3.02	
		Mercedes Benz Actross - Euro 2		11.26
Polvo de piedra triturada	Camión	KEN WORTH T370 - Euro 3	0.13	
		JAC HFC - 4253K3R1- Euro 3		0.512

Con estos datos especificados, se aplican las ecuaciones (4) y (5) planteadas por (Santana Oliveira L., 2015) y se obtiene el

consumo mínimo (CD min) y máximo (CD máx) de Diesel, el mismo que se obtiene en litros por tonelada (l/t). [38]

$$CD \text{ mín} = \frac{FC \text{ mín} \times NV \times MTT \text{ mín} \times D}{QTD} \quad (4) \quad [14]$$

$$CD \text{ máx} = \frac{FC \text{ máx} \times NV \times MTT \text{ máx} \times D}{QTD} \quad (5) \quad [14]$$

Dónde:

FC (mín y máx) = rango de consumo de diésel en (l / t.km), estimado a partir de datos de revistas del segmento de vehículos de transporte [51].

NV = número de viajes necesarios para transportar el total de cada material de la planta

MTT = masa total del transporte (carga transportada más la masa del camión)

D= distancia

QTD= cantidad total de materia prima

2.3.5 Indicador de energía incorporada

Para estimar la energía incorporada por tipo de bloque, se considera el transporte de materias primas, la energía incorporada del cemento y la energía consumida por la planta (energía eléctrica). El indicador por bloque se calcula con la suma de estos tres componentes; el valor se presenta en MJ / bloque. [38]

Con los volúmenes estimados de Diésel para transportar cada tonelada de materia prima, se calcula la cantidad de combustible que se utiliza para trasladar los materiales que contiene un bloque. Por esta razón, se multiplicaron estos dos valores (CD min y CD máx) referentes a cada insumo y posteriormente, se sumaron las partes. Multiplicando este resultado por el valor de la energía incorporada del Diesel, se calculó la energía incorporada por bloque referido al transporte de las materias primas [38].

La energía incorporada por consumo de cemento se calcula multiplicando el contenido de cemento de cada bloque, por el valor de la energía incorporada del cemento [38].

Los consumos energéticos en la fábrica, también se dan por el consumo de energía eléctrica, que a nivel país, se emplea para la mayoría de procesos [48]. Por ello, se solicita el gasto eléctrico anual de la fábrica, a partir del formulario respectivo. (Ver apéndice A). Con este valor expresado en MJ y dividido para la producción anual de bloques, se obtiene la cantidad de energía que se incorpora a cada pieza por consumo de electricidad.

2.3.6 Indicador de emisiones de CO₂

Las Directrices del IPCC proporcionan tres niveles para calcular las emisiones de CO₂ procedentes de la quema de combustibles, [55] [47], en el caso de estudio se aplica el nivel tres; las emisiones se calculan multiplicando la cantidad de combustible consumido por factores de emisión detallados por el tipo de combustible y específicos para la tecnología. “Los métodos de este nivel, en general calculan las emisiones sobre la base de los tipos de actividad (km recorridos o t.km transportadas) y una eficiencia de combustible o tasas de combustible específicas o un factor o factores de emisión expresados directamente en unidades de actividad” [55]. Con la ecuación (4), estima las emisiones de CO₂.

$$\text{Emisión de carbono} = \sum CD \times FE \quad (4) \quad [55]$$

Donde:

CD = consumo de combustible

FE = factor de emisión

Puntualmente, en el caso de estudio, procedimientos iguales a los utilizados para la estimación del indicador de energía incorporada fueron realizados para el cálculo del indicador de emisiones de CO₂. La emisión de cada pieza de bloque se calcula por medio de la suma de las emisiones del transporte de las materias primas, del cemento y la energía eléctrica consumida. Los valores se expresan en (KgCO₂ / bloque) [38].

Para determinar las emisiones por gasto de energía eléctrica, se considera el consumo anual de la fábrica en (kWh) y el factor de emisión de CO₂ al año 2016, facilitado por la Gerencia Nacional de Planeamiento de CENACE, equivalente a 0,6635 tCO₂/MWh.[52] El cálculo se realiza siguiendo la publicación de (Vilches R., et al., 2012) [47]. Como se considera la producción anual de la fábrica, se realiza la asignación de emisiones obtenidas a cada producto [14].

2.3.7 Indicador de residuos

Este indicador permite analizar la eficiencia en la fábrica y evaluar la calidad de sus procesos de moldeo, transporte y almacenamiento [38]. En el caso de estudio, se dispone de un valor anual que proviene de la contabilización de los bloques irregulares, rotos o trizados); no se reportan datos sobre los restos de producto formulado, ya sea fresco o endurecido u otra diversidad de residuos. La fábrica informa que parte de las pérdidas de productos, como rupturas o sobras, son trituradas nuevamente y reutilizadas, lo que dificulta el registro de datos específicos. Los productos considerados como residuos consumieron una cantidad de energía que se desaprovechó y que con sólo un análisis más detallado, pueden ser rastreados.

III. RESULTADOS

La demanda por tipo de pieza en la fábrica analizada, se muestra en la figura 4, el bloque mixto y el bloque de pomez son los de mayor solicitud, frente a los bloques de hormigón, que se elaboran únicamente bajo pedido.

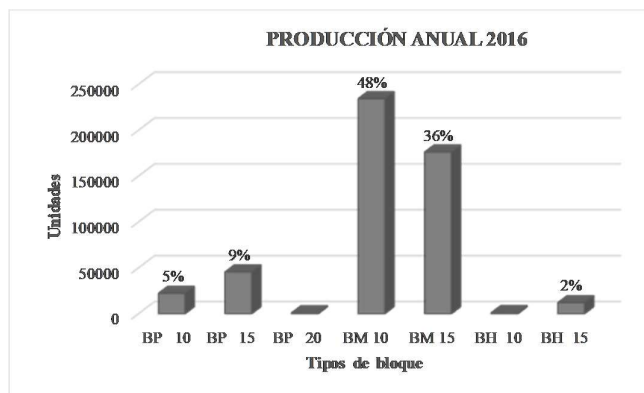
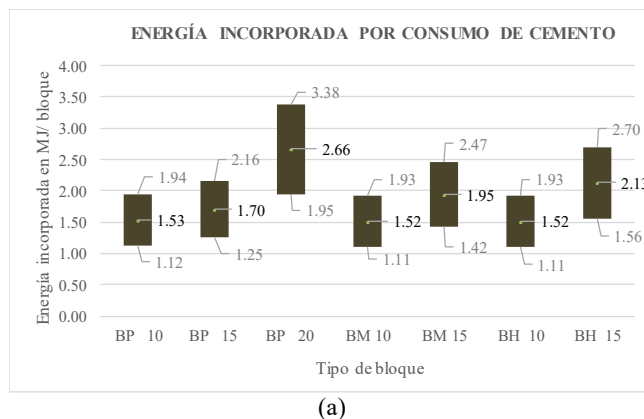


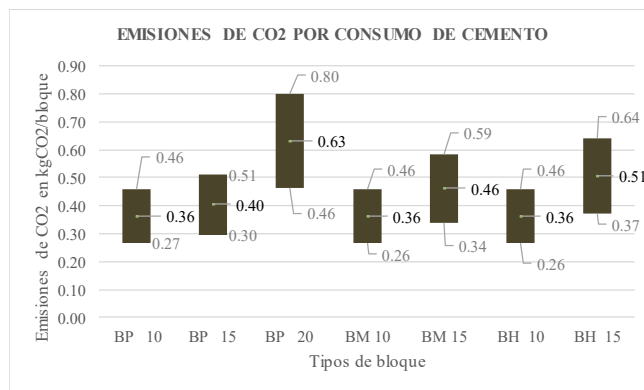
Figura 4 - Producción anual – 2016, por tipo de bloque

3.1 Consumo e Indicador de cemento

Los valores que se muestran en la figura 5, corresponden a los impactos ambientales por cemento en cada tipo de pieza. Los resultados se obtienen del producto entre el consumo de cemento por bloque, en t/bloque; y, los respectivos valores de energía incorporada y emisiones de CO₂ del cemento, tomados de la literatura y citados en la Tabla 2.



(a)



(b)

Figura 5 - Energía incorporada y emisiones de CO₂ por cemento, por tipo de bloque. (a) Energía incorporada; (b) Emisiones de CO₂

Del total de piezas analizadas, el que presenta mayores impactos por consumo de cemento es el bloque de pómez de 20 cm; por lo que se puede establecer que, la masa unitaria de los bloques afecta directamente a la cantidad de energía y emisiones incorporados en el producto.

3.2 Consumo e Indicador de agua

La tabla 4 muestra los tipos de bloque, el consumo anual de agua de la fábrica, la masa unitaria y su respectivo contenido de cemento en kg; mediante la ecuación (1), se obtiene la cantidad de agua contenida en cada pieza, en litros / bloque.

Tabla 4 – Contenido de agua en litros/bloque

Tipo de bloque	masa unitaria (mu) kg	masa de cemento (mce) kg/bloque	masa de agua (mw) mw= (20% mce + 7% mu) kg	densidad del agua kg/m3	*contenido de agua en litros/bloque
BP 10	7.069		0.61		0.61
BP 15	9.463		0.80		0.80
BP 20	9.855		0.90		0.90
BM 10	7.309	*	0.63	1000	0.63
BM 15	10.261		0.87		0.87
BH 10	8.582		0.72		0.72
BH 15	10.261		0.88		0.88

* Dato confidencial

Existe incertidumbre en este indicador, pues, factores como, el agua contenida en los agregados alcanzados durante la extracción o la incidencia del agua lluvia, sobre los mismos, son volúmenes difíciles de registrarse y generalmente, no se consideran. De igual manera, procesos de evaporación, absorción, humedad; dificultan la obtención de datos exactos en los cálculos.

Tomando los valores obtenidos mediante la ecuación (1), en la figura 6 se muestra el contenido de agua estimado para cada tipo de bloque.

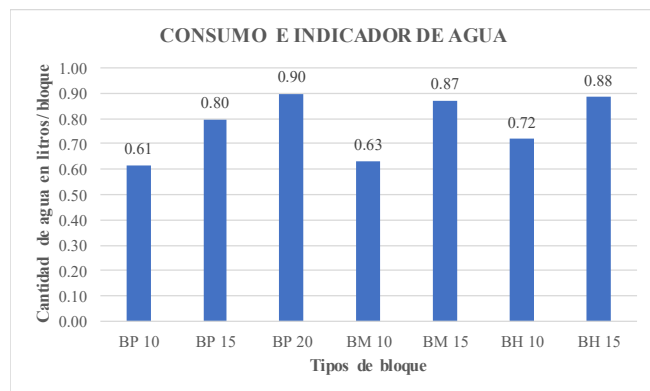


Figura 6 – Contenido de agua en litros por tipo de bloque

3.3 Consumo e Indicador de agregados

Las cantidades de agregados empleados por año para cada tipo de bloque, expresados en unidad de masa; se obtienen a partir de

las densidades de cada uno de ellos, expuestas en la tabla 2. Su composición por unidad, se muestra en la tabla 5; el cemento y el polvo volcánico son comunes en todas las piezas; el chasqui es empleado en el bloque de pómez y en el mixto; el polvo de piedra triturada en el bloque mixto y en el de hormigón. Los valores relacionados al consumo de cada uno de los agregados por tipo de bloque en la producción anual; son de carácter confidencial.

Tabla 5 - Agregados empleados por tipo de bloque

Tipos de bloque	Tipos de agregados			
	Cemento	Chasqui	Polvo volcánico	Polvo de piedra triturada
Pómez	X	X	X	
Mixto	X	X	X	X
Hormigón	X		X	X

La figura 7 señala el consumo anual de agregados por tipo de bloque en el periodo analizado, se observa una mayor incidencia por consumo de agregados en los bloques mixtos.

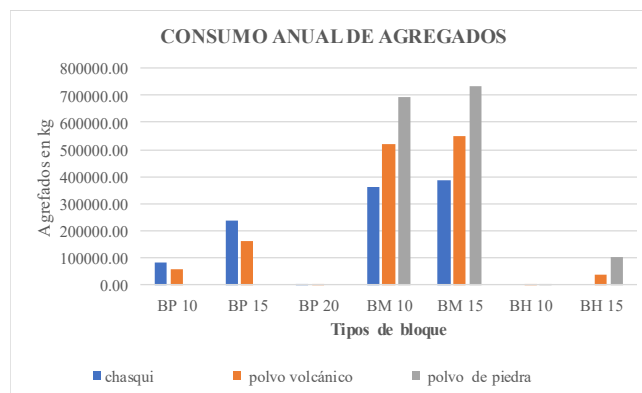


Figura 7 - Consumo anual de agregados por tipo de bloque

3.4 Consumo de combustible por transporte de materia prima

El resultado del producto entre: el consumo de combustible, citado en la tabla 4; y el contenido de cemento, chasqui, polvo volcánico y polvo de piedra triturada, respectivamente; se obtiene el rango mínimo y máximo de consumo de Diesel por transporte de cada materia prima; estos valores, se asignan luego en términos de la unidad funcional; litros por bloque.

El consumo total de Diesel (por transporte de cemento y agregados), multiplicado por el factor de energía incorporada del mismo, expuesto en la tabla 2; genera el resultado de la energía incorporada por transporte de materia prima por bloque, que se muestra en la figura 8.

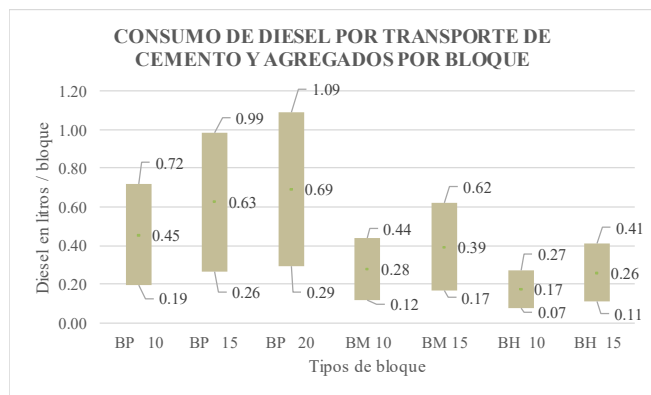
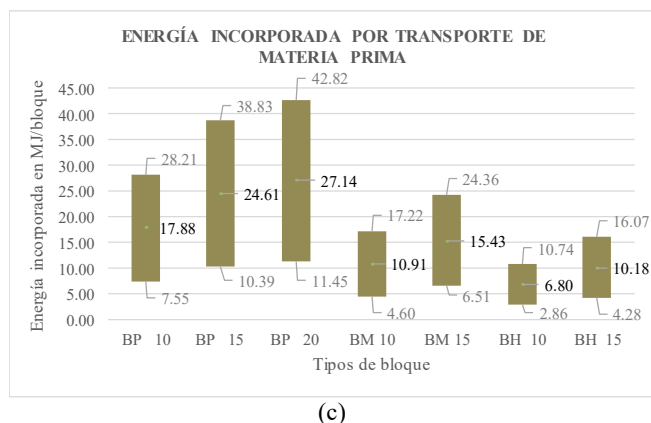
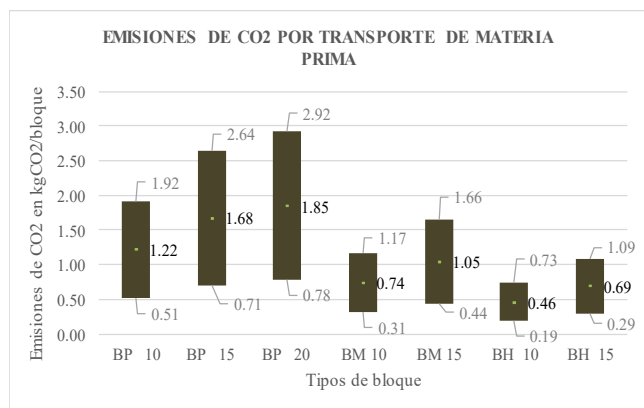


Figura 8 – Consumo de Diesel por transporte de: cemento chasqui, polvo volcánico, polvo de piedra triturada

La figura 9 (c) y (d) presenta los resultados expresados en rangos: mínimo, medio y máximo, energía incorporada y emisiones de CO₂ por transporte de materia prima, estimados para cada producto. El bloque de pómez en todas sus dimensiones, presenta mayor energía incorporada, mientras que los bloques de hormigón, presentan menor incidencia; situación similar ocurre con las emisiones de CO₂.



(c)



(d)

Figura 9 - Energía incorporada y emisiones de CO₂ por transporte de materia prima, por tipo de bloque. (c) Energía incorporada; (d) Emisiones de CO₂

3.5 Indicador de energía incorporada

La adición de los valores asociados a la energía incorporada de cada uno de los indicadores analizados, generan el resultado total. De esta manera, la figura 10 presenta los resultados totales de energía incorporada, expresados en rangos mínimo medio y máximo, respectivamente.

De los diferentes tipos de bloque, se compara entre las piezas de 15 cm, en donde se identifica que, los bloques de pómez presentan mayor impacto ambiental dentro de las categorías de consumo de recursos energéticos y calentamiento global, analizadas en el presente estudio. Sin embargo, estas piezas no son las de mayor demanda en la fábrica. El de menor incidencia es el bloque de hormigón.

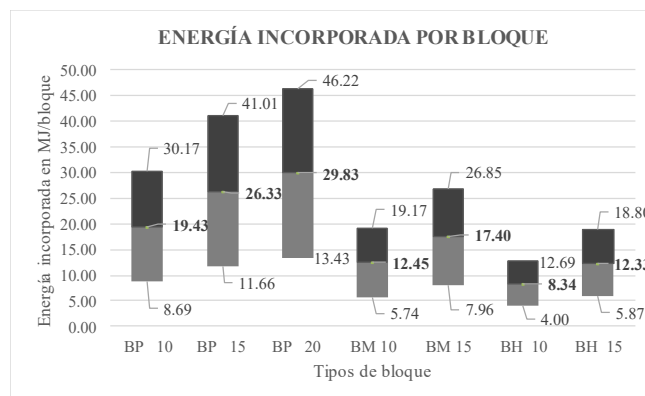


Figura 10 - Rango de energía incorporada por tipo de bloque

3.6 Indicador de emisiones de CO₂

Consecuentemente, la figura 11, muestra que los bloques que presentan mayor energía incorporada, generan mayores emisiones de CO₂; el bloque de pómez de 15cm emite un 47% más que el bloque de hormigón de 15cm.

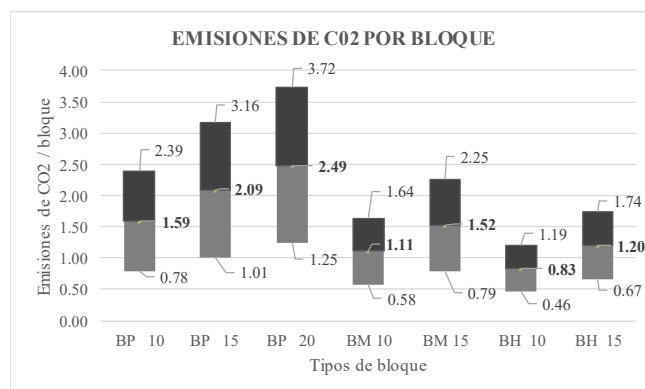


Figura 11 - Rango de emisiones de CO₂ por tipo de bloque

VI. DISCUSIONES

El estudio contextualizó la metodología del ACV y aplicó un método de cálculo validado, para determinar que los valores en términos de energía incorporada y emisiones de CO₂ obtenidos en la producción del bloque de pómez, son mayores a los que resultan del bloque de hormigón y mixto; datos que, hasta la fecha, no se disponían en el medio.

La presencia de varios tipos de bloque en el mercado, definidos por dimensiones y dosificaciones distintas, ampliaron el alcance de la investigación. De hecho, esta diversidad generó incertidumbre al momento de elegir una sola pieza para el análisis, pues no se tenía la certeza de cuál es la de mayor demanda en el sector. En el análisis de cada bloque se presentaron dificultades, pues, se requirió estimar la cantidad de materia prima empleada en cada una de las piezas analizadas. Cabe señalar que, no es fácil el acceso y la divulgación de cierta información por parte de las empresas, ya que algunos datos se consideran como documentación restringida por parte del fabricante.

La realización del inventario, es también compleja, pues, la mayoría de fábricas seleccionadas dentro de la delimitación del área de estudio, no registraban sus flujos con miras a determinar impactos ambientales; por desconocimiento o por no tener la necesidad de desarrollarlos. Sin embargo, sólo a través de ICV con datos primarios recopilados por las industrias, es posible revelar indicadores que reflejen con precisión los impactos ambientales y con ello, identificar estrategias y mejoras para cambiar el escenario actual.

La ausencia de datos nacionales de energía incorporada y factores de emisión de CO₂, específicamente de la extracción de los agregados, se consideran como limitaciones para el desarrollo del estudio.

En principio se esperaba que existiera una mínima variación entre las piezas con iguales dimensiones. Sin embargo, se encontraron diferencias notables, debido a la masa unitaria, la misma que afecta directamente a la cantidad de energía incorporada y emisiones de CO₂ por las dosificaciones de cada producto.

El cemento es un factor determinante en algunos estudios, sin embargo, los resultados obtenidos en esta investigación, muestran que los valores extremos no están necesariamente asociados al menor o mayor consumo del mismo. Datos sobre bloques en China, han demostrado que la carga ambiental, por ejemplo, de la pieza de hormigón con agregado ligero, se genera principalmente por la producción de cemento, lo que representa el 42% del impacto ambiental total [35]. De los resultados obtenidos, considerando los tipos de bloque de 15cm, el de hormigón presenta un menor consumo energético y emisiones de CO₂. Si se analiza la incidencia del cemento en la energía incorporada total de cada pieza, se tiene: 6% en el bloque de pómez; 11% en el mixto y 17% en el de hormigón. En cuanto a las emisiones de CO₂ representa un: 15% en el bloque de pómez; 22% en el mixto y 29% en el de hormigón.

Estudios indican que las características de la máquina en la etapa de prensado, es probablemente un importante motor de consumo de esta materia prima. Una mayor eficiencia en la compactación significaría mayor eficiencia en el consumo de cemento. Evidentemente, la minimización de impactos dependería también de otros factores como las características de las partículas, distribución y forma del agregado; el agua y el contenido de aditivos. Parámetros que se relacionan directamente en la velocidad de compactación obtenida con una determinada cantidad de energía [38].

Otras estrategias que minimicen el consumo de cemento, podrían ser por medio de la selección de agregados; pues, tanto la resistencia como la durabilidad de estos productos, dependen de las propiedades físico - químicas de estos insumos. En el caso de estudio, la elaboración del bloque depende de agregados que se encuentran hasta 375 km de la fábrica; cuyas características pueden presentar variaciones durante los procesos de explotación, manejo y transporte. Sin embargo, razones técnicas podrían determinar el seguir o no transportando estos insumos y no otros más cercanos. Pues un cambio, podría generar impactos negativos en la mezcla. Sin embargo, verificar constantemente la calidad del agregado disponible en la región, es un factor limitante que la mayoría de veces está fuera del control del fabricante.

En este estudio, se realizó el análisis de la influencia de la distancia del transporte indirecto por materia prima, pero no fueron analizados los impactos causados por el retorno de los camiones y por la distribución del producto. En el primer caso, hay incertidumbre sobre si el vehículo vuelve vacío o cargado con otro producto, mientras que en el segundo caso, son muy variadas las distancias posibles. En ambos análisis se necesitaría el levantamiento pormenorizado de esta información en la fábrica, generando complejidad para el resultado final. No obstante, (Santana Oliveira L.) señala que, si el retorno del vehículo vacío estuviera incluido en el análisis, esto incrementaría en promedio el 35% de energía incorporada y las emisiones de CO₂ relacionados con el transporte [38].

De la información obtenida, los datos señalan que las entradas con mayor distancia corresponden al chasqui y al polvo volcánico, con 375 km; el polvo de piedra triturada con 17 km y el cemento con 3.5 km. A partir de ello, se determinó los impactos dirigidos al bloque, relacionados con el transporte de cada tonelada de materia prima.

Se puede asumir que los responsables de los rangos extremos de energía incorporada y emisiones de CO₂ del bloque analizado, estarían asociados principalmente al transporte, afirmación que coincide, con lo planteado por (Arrigoni A. et al., 2017) [56]. Considerando los diferentes tipos de bloque de 15cm, se identifica que: la incidencia de energía incorporada por transporte de materia prima, en el bloque de pómez es del 94%, en el mixto es del 89% y en el de hormigón es del 83%. En cuanto a las emisiones de CO₂, en el bloque de pómez es del 63%, en el mixto es del 50% y en el de hormigón es del 39%.

Del proceso de fabricación de cada tipo de bloque, sin considerar la incidencia del transporte indirecto, los valores obtenidos por

energía incorporada fueron: 1.72 MJ/bloque, para el bloque de pómez de 15 cm; 1.97 MJ/bloque, para el bloque mixto de 15 cm; y, 2.15 MJ/bloque, para el bloque de hormigón de 15 cm. Luego, los valores que se obtuvieron por emisiones de CO₂, fueron: 0.41 kg/CO₂, para el bloque de pómez de 15 cm; 0.47 kg/CO₂, para el bloque mixto de 15 cm; y, 0.51 kg/CO₂, para el bloque de hormigón de 15 cm.

La incertidumbre en relación al indicador consumo de agua, en todas las fases del ciclo de vida de los materiales, es evidente. Datos de inventario de agua para la producción de concreto y sus materias primas son limitados e inconsistentes [9]. Actualmente no existe una metodología consolidada que sea simple y fácil de usar para la cuantificación de la misma [38]. En este caso, se conoce que existe una cantidad adicional de agua en los agregados y un porcentaje que reacciona químicamente con el cemento; se entiende que estos valores no están controlados y su cuantificación, requiere de métodos normalizados para estas mediciones [38] [23].

La norma ISO 14046, contiene principios, requisitos y directrices específicas sobre la huella hídrica, misma que puede aplicarse a productos, procesos, organizaciones y empresas; y aunque ello es factible, estas empresas presentan dificultades para inventariar el agua, problemas que se hacen manifiestos en conceptos como: extracción, descarga y consumo de agua de cada metodología de inventario; a lo que se suman las diferentes rutas tecnológicas e incluso, diferentes ubicaciones geográficas [57]. De ahí que el inventario de agua podría ser considerado como un componente a ser tratado con profundidad en futuras investigaciones.

Similar situación se presentó en el análisis del indicador residuos; el control que lleva la fábrica, hace referencia al número de piezas rotas que se producen en ocasiones durante la distribución del material, datos que no se disponen detalladamente. El manejo de la información a través de una ficha de análisis se lo deberá considerar en un estudio específico sobre el tema.

Conforme lo descrito, para realizar una revisión de los resultados, se considera el dato de la publicación de (Santana Oliveira L. et al., 2015) [38]. En donde se analiza el bloque de hormigón de (14x19x39) con límite: de la cuna a puerta; la energía incorporada y las emisiones de CO₂ equivalen a: 13 MJ/ bloque y 2.2 kgCO₂ /bloque, respectivamente. De este estudio considerando el bloque de hormigón de (15x20x40), se obtuvo: 12.33 MJ/bloque y 1.20 kgCO₂/bloque.

Consecuentemente, los resultados de este estudio, pueden ser incorporados en herramientas de software específicas, para obtener la evaluación de todas las categorías de impacto ambiental del material analizado.

V. CONCLUSIONES

El análisis de los flujos materiales, energéticos y contaminantes, se aplican para evaluar los impactos ambientales de los bloques. La energía incorporada y emisiones de CO₂, considerando los tipos de bloque de 15cm, oscilan entre: 26.33 MJ/bloque - 2.09 kgCO₂/bloque (pómez); 17.40 MJ/bloque - 1.52 kgCO₂/bloque

(mixto); 12.33 MJ/ bloque - 1.20 kgCO₂/bloque (hormigón). Para los tipos de bloque de 10cm, se obtuvo: 19.43 MJ/bloque - 1.59 kgCO₂/bloque (pómez); 12.45 MJ/bloque - 1.11 MJ/bloque (mixto); 8.34 MJ/bloque - 0.83 kgCO₂/bloque (hormigón).

El impacto del transporte tiene una incidencia significativa. Los resultados de energía incorporada y emisiones de CO₂ se deben a las distancias y modos de transporte de materias primas.

Otros factores como la masa unitaria de cada pieza, las diferentes dosificaciones y la calidad de los agregados, influyen también en los resultados.

El análisis de los indicadores: cemento, agregados, transporte, agua y residuos; ejecutados en el presente estudio, son alternativas validadas que conducen a acciones encaminadas a reducir los impactos ambientales del ciclo de vida, asociados con la producción del bloque.

El indicador más complejo en identificar en la fábrica es el consumo de agua, seguido de los residuos. El control de ellos, permite determinar la eficiencia de la producción.

En la etapa de fabricación de materiales existe diversas formas de consumo de energía y combustibles y, por tanto, significativas emisiones de CO₂; cualquier proceso o mejora en términos energéticos, reducirían significativamente el perfil ambiental de cualquier producto. La creación de políticas que fomenten la difusión de declaraciones medio ambientales es una forma de cultura y organización en el sector de la industria. De ahí que, es necesario iniciar con estas acciones a nivel país.

Durante el desarrollo de este trabajo, no fue posible contar con datos y documentación nacional, sobre energía incorporada y emisiones de CO₂ de la extracción y procesamiento de los agregados considerados en este análisis. La investigación realizada genera un compendio documental de base que, de ser factible, podría incorporarse a futuras investigaciones relacionadas con el tema.

AGRADECIMIENTOS

El autor agradece a la Universidad de Cuenca y a la Maestría en Arquitectura bioclimática, confort y eficiencia energética, por los aportes al conocimiento y al progreso en la formación profesional. Se reconoce el trabajo de quienes hacen parte del proyecto “Método de certificación de la construcción sustentable de viviendas” de la Universidad de Cuenca; quienes han establecido los parámetros para la aplicación de la metodología del ACV en el sector de materiales de construcción en el medio; de la cual, la presente investigación forma parte. Al propietario de la fábrica, por su accesibilidad al permitir el desarrollo del estudio y brindar las facilidades para la recopilación de datos, aspecto fundamental para el desarrollo del presente trabajo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] G. Ding, P. J. Forsythe, G. Ding, and P. J. Forsythe, "Sustainable construction : life cycle energy analysis of construction on sloping sites for residential buildings Sustainable construction : life cycle energy analysis of construction on sloping sites for residential buildings," vol. 6193, no. October, 2016.
- [2] L. F. Cabeza, C. Barreneche, L. Miró, J. M. Morera, E. Bartolí, and A. I. Fernández, "Low carbon and low embodied energy materials in buildings : A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 23, pp. 536–542, 2013.
- [3] R. Bermejo, *Del desarrollo sostenible según Brundtland a la sostenibilidad como biomimesis Roberto Bermejo Gómez de Segura*. 2013.
- [4] G. Wadel, J. Avellaneda, and A. Cuchí, "La sostenibilidad en la arquitectura industrializada : cerrando el ciclo de los materiales," vol. 62, pp. 37–51, 2010.
- [5] A. S. Chang and C. Y. Tsai, "Sustainable design indicators : Roadway project as an example," vol. 53, pp. 137–143, 2015.
- [6] A. Estokova, S. Vilcekova, and M. Porhincak, "Analyzing embodied energy , global warming and acidification potentials of materials in residential buildings," *Procedia Eng.*, vol. 180, pp. 1675–1683, 2017.
- [7] E. Giama and A. M. Papadopoulos, "Assessment tools for the environmental evaluation of concrete , plaster and brick elements production," 2015.
- [8] N. A. Babak, "Transport Construction Negative Impact on the Environment," *Procedia Eng.*, vol. 189, no. May, pp. 867–873, 2017.
- [9] C. Shi, D. Wang, F. He, and M. Liu, "Weathering properties of CO₂-cured concrete blocks," *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 65, pp. 11–17, 2012.
- [10] C. Ingrao *et al.*, "Energy and environmental assessment of industrial hemp for building applications : A review," vol. 51, pp. 29–42, 2015.
- [11] C. Udawattha and R. Halwatura, "Embodied Energy of Mud Concrete Block (MCB) Versus Brick and Cement Blocks," *Energy Build.*, vol. 126, no. May, pp. 28–35, 2016.
- [12] C. Study, S. Typology, and U. Bío-bío, "Estudio del flujo energético en el ciclo de vida de una vivienda y su implicancia en las emisiones de gases de efecto invernadero , durante la fase de construcción Caso Estudio : Vivienda Tipología Social . Región del Biobío , Chile," pp. 125–145, 2012.
- [13] M. Marrero, M. P. Mercader, and C. Leiva, "Minimización del impacto ambiental en la ejecución de fachadas mediante el empleo de materiales reciclados," vol. 65, no. may 2012, pp. 89–97, 2013.
- [14] L. Santana, S. Almeida, and V. Moacyr, "Variability in the life cycle of concrete block CO₂ emissions and cumulative energy demand in the Brazilian Market," *Constr. Build. Mater.*, vol. 114, no. January 2015, pp. 588–594, 2016.
- [15] J. P. Cárdenas, E. Muñoz, C. Riquelme, and F. Hidalgo, "Simplified life cycle assessment applied to structural insulated panels homes Análisis de ciclo de vida simplificado aplicado a viviendas de paneles SIP (structural insulated panels)," vol. 30, pp. 33–38, 2015.
- [16] Ministerio Coordinador de Sectores Estratégicos, "Resumen Balance Energético Nacional 2016," 2015.
- [17] INER, "Eficiencia energética en industrias," 2014.
- [18] INER, "Caracterización térmica de materiales y elementos constructivos para edificaciones sostenibles , mediante implementación de laboratorios ," vol. 0, pp. 1–32, 2016.
- [19] Instituto Nacional de Estadísticas y Censos, "Anuario de estadísticas de edificaciones 2015," 2015.
- [20] J. Macias, L. Iturburu, C. Rodriguez, D. Agdas, A. Boero, and G. Soriano, "Embodied and operational energy assessment of different construction methods employed on social interest dwellings in Ecuador," *Energy Build.*, vol. 151, pp. 107–120, 2017.
- [21] T. Gordillo, "Bloques de hormigón," 1946.
- [22] L. G. Breitenbach, U. Ppgem, and F. Kirch, "A case study about embodied energy in concrete and structural masonry buildings," vol. 13, no. 2, pp. 9–14, 2014.
- [23] H. Kus, E. Özkan, Ö. Göcer, and E. Edis, "Hot box measurements of pumice aggregate concrete hollow block walls," vol. 38, pp. 837–845, 2013.
- [24] V. G. Mena and D. O. Valdez, "Sobre la evaluación de la sostenibilidad de materiales de construcción," vol. 9, 2015.
- [25] M. T. B. L and F. Q. M, "Eficiencia energética en el sector residencial de la Ciudad de Cuenca , Ecuador," vol. 7, no. 2, pp. 147–165, 2016.
- [26] INEN, "Norma Técnica Ecuatoriana," 2000.
- [27] INEN, "Gestión ambiental. Análisis de ciclo de vida. REquisitos y Directrices (ISO 14044:2006, IDT)," 2014.
- [28] N. técnica ecuatoriana I. I. – I. 14049 Instituto Ecuatoriano de Normalización, "Gestión ambiental – Evaluación del Ciclo de Vida. Ejemplos de aplicación de ISO 14044 para la definición del objetivo y el alcance y para el Análisis del Inventario (ISO/TR 14049:2012, IDT)," 2014.
- [29] Norma Española Experimental, "Análisis de ciclo de vida simplificado UNE 150041 EX," 1998.
- [30] INEN, "Norma Técnica," vol. 0, 2010.
- [31] Instituto Ecuatoriano de Normalización NTE INEN 638, "Bloques huecos de hormigón. Definiciones, Clasificación y Condiciones Generales.," 2014.
- [32] A. Petrillo, R. Cioffi, C. Ferone, and F. Colangelo, "Eco-sustainable Geopolymer concrete blocks production process," vol. 8, pp. 408–418, 2016.
- [33] J. Mohammadi, W. South, J. Mohammadi, and W. South, "Life cycle assessment (LCA) of benchmark concrete products in Australia Life cycle assessment (LCA) of benchmark concrete products in Australia," no. January, 2017.
- [34] L. Peixoto, P. Vitale, C. Santos, and G. Penteado, "Life cycle assessment of natural and mixed recycled aggregate production in Brazil," *J. Clean. Prod.*, vol. 151, pp. 634–642, 2017.
- [35] M. Academy, M. Test, W. Li, and Q. Street, "Life

- Cycle Assessment of Lightweight Aggregate Concrete Block,” vol. 599, pp. 66–69, 2014.
- [36] C. Li, Z. Nie, S. Cui, X. Gong, Z. Wang, and X. Meng, “The life cycle inventory study of cement manufacture in China,” *J. Clean. Prod.*, vol. 72, pp. 204–211, 2014.
- [37] E. Van Der Voet, L. Van Oers, T. Rydberg, J. Westerdahl, and H. F. Larsen, “Life Cycle Assessment of Additives : Methodology and Data,” no. August 2012, pp. 7–23, 2013.
- [38] S. A. O. Paulo, “AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DE BLOCOS DE CONCRETO DO MERCADO BRASILEIRO : ALVENARIA E PAVIMENTAÇÃO,” 2015.
- [39] International Reference Life Cycle Data System, *ILCD Handbook - General guide for Life Cycle Assessment - Detailed guidance*. 2010.
- [40] Ihobe, “Análisis de ciclo de vida y huella de carbono,” 2009.
- [41] M. Bowick, “A Canadian Industry-Average Cradle-to-Gate Masonry Unit Products,” no. August, 2016.
- [42] K. B. Blocks, K. B. A. Blocks, K. X. C. Blocks, K. B. Strop, and X. C. Roof, “Environmental product declaration,” no. May, pp. 1–10, 2009.
- [43] A. Industries, “Enviroblock Dense Blocks EPD for precast concrete blocks,” no. February, pp. 1–12, 2015.
- [44] A. Industries, “Enviroblock Lightweight Blocks EPD for precast concrete blocks,” no. February, pp. 1–12, 2015.
- [45] H. L. Wei, J. R. Ni, and N. Xu, “Environmental Effects Energy , Material and Pollutant Intensity Analysis in the Life Cycle of Walling Materials Energy , Material and Pollutant Intensity Analysis in the Life Cycle of Walling Materials,” vol. 7036, no. October, 2016.
- [46] IPCC, “INTRODUCCIÓN,” *Directrices del IPCC*, pp. 1–30, 2006.
- [47] S. U. R. A. Ñ. O. Base, S. Campus, R. Vilches, and F. Dávila, “A GRANJA : DETERMINACIÓN DE LA HUELLA DE CARBONO EN LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA , SEDE QUITO , CAMPUS SALESIANA UNIVERSITY ,” vol. 21, no. 1, pp. 34–45, 2015.
- [48] Instituto Ecuatoriano de Normalización NTE INEN 856: 2010, “Áridos. Determinación de la densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción del árido fino,” *Cpe Normas Para Estud. Y Diseño Sist. Agua Potable Y Disposición Aguas Residuales Para Poblaciones Mayores a 1000 Habitantes*, vol. 1, no. Primera Edición, p. 290, 1992.
- [49] Holcim, “Memoria de sostenibilidad 2015,” 2015.
- [50] Holcim, “Informe de Desarrollo Sostenible 2015,” 2015.
- [51] P. Researcher, “Energy sustainability of Ecuadorian cacao export and its contribution to climate change . A case study through product life cycle assessment,” vol. 112, pp. 2560–2568, 2016.
- [52] CENACE, “Informe 2016 Factor de emisión de CO₂ del Sistema Nacional Interconectado,” 2017.
- [53] A. D. González, “Energy and carbon embodied in straw and clay wall blocks produced locally in the Andean Patagonia,” *Energy Build.*, vol. 70, pp. 15–22, 2014.
- [54] M. D. Bovea and A. Ferr, “Eco-efficiency analysis of the life cycle of interior partition walls : a comparison of alternative solutions ~ ez-For e,” vol. 112, 2016.
- [55] IPCC, “Manual del Sector de la Energía Quema de Combustibles,” 1996.
- [56] A. Arrigoni, R. Pelosato, P. Melià, G. Ruggieri, and G. Dotelli, “Life cycle assessment of natural building materials: the role of carbonation, mixture components and transport in the environmental impacts of hempcrete blocks,” *Clean. Prod.*, 2017.
- [57] Y. L. Mack-vergara and V. M. John, “Resources , Conservation and Recycling Life cycle water inventory in concrete production — A review,” *Resources, Conserv. Recycl.*, vol. 122, pp. 227–250, 2017.
- [58] V. M. Sánchez Fajardo, M. E. Torres, and A. J. Moreno, “Hydraulic and hygrothermal properties of lightweight concrete blocks with basaltic lapilli as aggregate,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 94, pp. 398–407, 2015.
- [59] J.-P. Guilbaud, H. Carvalho, V. Baroghel-Bouny, and A. Raharinaivo, “Estudio del contenido de humedad en un material en base cemento midiendo su impedancia y su gamma-densitometría,” *Mater. construcción*, vol. 50, no. 257, pp. 5–14, 2000.
- [60] Instituto Ecuatoriano de Normalización INEN 642, “Bloques huecos de hormigón. Determinación de la absorción de agua,” vol. 642, 1993.
- [61] INAMHI, “Anuario meteorológico,” 2015.
- [62] EPD. Product Category Rules – UN CPC 375 – Concrete. The International EPD ®System. 2013.
- [63] Burak Felekoglu, “A method for improving the early strength of pumice concrete blocks by using alkyl alkoxy silane (AAS),” *Constr. Build. Mater.*, vol. 28, pp. 305–310, 2012.

APÉNDICE A

FORMULARIOS DE ENCUESTA PARA LA RECOPIACIÓN DE DATOS

DATOS GENERALES DE LA FÁBRICA			
Razón Social:			
País:		Ciudad:	
Dirección:			
Teléfono:		e-mail:	

DATOS DE LA PLANTA DE PRODUCCIÓN			
Responsable de la producción - cargo:		N° de personas en el proceso de producción:	
Modo operativo:	h/semana:	días / mes:	meses / año:
Fecha de inicio de toma de datos:		Fecha de finalización de toma de datos:	
Periodo considerado para recolección de datos:			

CONSUMO DE AGUA

HOJA DE DATOS PARA CUANTIFICACIÓN DEL AGUA

Elaborado por:				
Identificación del proceso unitario:		CONSUMO DE AGUA		
Periodo de tiempo:		Mes de inicio:	Mes de finalización:	
Uso del agua dentro de las instalaciones		Consumo total de agua en el período de estudio		
		Origen / Fuente	Periodo	Cantidad (m3)
			Enero	
			Febrero	
			Marzo	
			Abril	
			Mayo	
			Junio	
			Julio	
			Agosto	
			Septiembre	
			Octubre	
			Noviembre	
			Diciembre	
		Total anual		
Observaciones:				

CONSUMO DE ENERGÍA ELÉCTRICA

HOJA DE DATOS PARA CUANTIFICACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

Elaborado por:				
Identificación del proceso unitario:		CONSUMO DE ENERGÍA ELÉCTRICA		
Periodo de tiempo:		Mes de inicio:	Mes	
Uso de energía eléctrica dentro de las instalaciones		Consumo total de energía eléctrica en el período de estudio		
		Origen / Fuente	Periodo	Cantidad (kWh)
			Enero	
			Febrero	
			Marzo	
	Abril			
	Mayo			
	Junio			
	Julio			
	Agosto			
	Septiembre			
	Octubre			
	Noviembre			
	Diciembre			
	Total anual			
Observaciones:				

CONSUMO DE COMBUSTIBLE POR TRANSPORTE

HOJA DE DATOS PARA EL TRANSPORTE INDIRECTO (AGUAS ARRIBA)

Elaborado por:												
Identificación del proceso unitario:								CONSUMO DE COMBUSTIBLE POR TRANSPORTE DE MATERIA PRIMA				
Periodo de tiempo:								Mes de inicio:		Mes de finalización:		

Fecha: día / mes / año	Nombre del producto / materia prima	Ciudad / provincia / Origen	Transporte por carretera									
			Tipo de vehículo	Modelo / Marca de vehículo/ Tecnología	Masa del camión (kg)	Masa de la carrocería (kg)	Tipo de combustible	Distancia a la fábrica (km)	Capacidad de carga del camión (toneladas)	Carga real (toneladas / m3 o kg)	Cantidad total de entradas transporta-das	Consumo total de combustible (galones)

Observaciones:

Regresa vacío

Regresa lleno

CONSUMO DE MATERIA PRIMA
HOJA DE DATOS CONSUMO DE ...

Elaborado por:					
Identificación del proceso unitario:		ENTRADA MATERIA PRIMA			
Periodo de tiempo:		Mes de inicio:		Mes de finalización:	
Entradas de materia	Periodo	Cantidad (m3)	Subtotal (kg)	Ciudad / Origen	Distancia a la fábrica (km)
	Enero				
	Febrero				
	Marzo				
	Abril				
	Mayo				
	Junio				
	Julio				
	Agosto				
	Septiembre				
	Octubre				
	Noviembre				
	Diciembre				
	TOTAL			CONSUMO ANUAL TOTAL DE ...	
OBSERVACIONES					

SALIDA DE PRODUCTOS
HOJA DE DATOS PARA SALIDAS

Elaborado por:		
Identificación del proceso unitario:	BLOQUE DE ...	
Periodo de tiempo:	Mes de inicio:	Mes de finalización:

Fecha: día / mes / año	Salidas de materiales (incluyendo productos)	Unidades	Cantidad	Destino
TOTAL				
OBSERVACIONES				